土木学会論文集B2（海岸工学）
Vol. B2-65，No.1，2009，1346-1350

津波リスクマップ作成のための人的被害評価手法の検討

Study on the Evaluation Method of Human Loss for Making Tsunami Risk Map

宍戸直哉[1]・今村文彦[2]

Naoya SHISHIDO and Fumihiko IMAMURA

The map showing Tsunami risk on geographic information is very important to let the people become aware of it as well as to promote the tsunami disaster countermeasure. The evaluation of risk given by the probability of occurrence and damage is during discussion. In this paper, we focus on damage evaluation of human loss through reviewing previous studies and proposing a new method to estimate the tsunami casualty by using fragility function and evacuation. Then we compare the results of evaluated casualty by using them to know their differences and applicability at city of Higashi Matsushima in Japan.

1. はじめに

我が国の津波被害軽減対策は，ソフト対策とハード対策の融合した総合対策であり，依然としてその重要性は高い．しかしながら，現状としてハード対策においては，要保全海岸の約37%（平成19年）で保全施設が未整備の状態であり（中長期的な展望に立った海岸保全検討会, 2007），さらに今日の社会情勢から海岸事業費の縮減が進められている．また，ソフト対策において有効手段の一つとされるハザードマップは，作成マニュアル等が作成されているが，要保全海岸を有する市町村全体の約43%（平成20年）程度に留まっている．この現状を脱却し，的確なソフト・ハード双方の防災対策を講じるには，事前に津波の危険性（被害規模や頻度）の程度を知る手段が必要である．例えば，費用対効果を明確にした上での効率的な事業投資評価や，災害補償の分野において被害検討を行う場合である．これらを検討するためには，任意規模の津波発生確率と津波による被害規模を適切に認識する必要がある．

津波防災対策の推進やリスクを適切に認識するには，地理情報上にリスク情報を掲載したマップ作成は非常に重要となる．どのようなリスクをどのように推定するかは議論の最中である．既往研究の多くは津波発生に関するリスク評価であり，津波による被害のリスク評価はほとんど行われておらず，可視化の試みまではされていない（例えば, 河田ら, 1994, 1997）．また津波被害推定に関する研究は最近精力的に行われ，自治体や国（中央防災会議）などでも，地震と共に津波の被害予測結果が出されている．しかし，推定手法が複数提案されていたり，評価方法も統一されていない．そこで本研究では，リスクマップ作成での一項目である家屋・人的被害推定手法に着目し，既往研究をレビューしさらに新しい手法も提案する．その結果より，宮城県東松島市を対象とした津波浸水予測を実施し，被害・リスクマップ作成に必要な被害推定手法の違いによる結果の比較検討を目的とする．

2. 津波リスクの定義

一般にリスクとは，ある有害な原因により損失を伴う危険な状態が発生する際の，[損失]×[その損失が発生する確率]の総和であると定義されている（日本リスク研究学会, 2006）．

津波のリスク評価を行う際，このリスクは，津波ハザードにより発生する被害の大きさと，その津波ハザードの来襲する確率を組み合せたものと考えられる．したがってここでは，[発生する被害]×[津波ハザード来襲確率]を津波のリスクと定義することにする．

3. 人的被害評価手法の概要

津波被害は多種多様であり，直接被害と間接被害（経済被害等で目に見えない影響・ダメージ）に大きく分類される．さらに，1次被害と2次被害が考えられ，2次被害は，漂流物による破壊，火災，土砂移動などの被害が含まれる（首藤ら, 2007 ; 今村, 2008）．また，被害評価においては，家屋やインフラ施設など津波来襲時に移動できないものと，人・交通（車，電車）など避難行動で被害を軽減できるものとに大きく分かれる．本研究では，防災対策の基本にある，国民の生命，身体を災害から保護するという目的を最重要と位置づけ，津波による被害評価の中で人的被害を取り上げて評価する．

（1）既存の人的被害評価手法

これまで，津波による人的被害の評価手法は複数提案されており，自治体や研究機関において用いられている手法はそれぞれ異なっている．これらの手法の中で，津波の人的被害評価手法として多くの自治体や研究機関で

1 学生会員　東北大学 大学院工学研究科　土木工学専攻
2 正会員　　工博　　東北大学教授　大学院工学研究科

表-1　既存の人的被害評価手法

評価手法	パラメータ	人的被害算定式
宮野・呂(1992)	建物被害棟数	$D = 0.072 \times (L + \frac{1}{2}M)^{1.018}$
静岡県(2001)	建物被害棟数	$D = 0.0424 \times exp[0.1763$
	人口データ	$\times (l + \frac{1}{2}\mathrm{m})]/100 \times P$
中央防災会議	浸水深	$D = P \times 0.0282$
	人口データ	$\times exp(0.2328 \times h)$

D:死者数(人)，L:大破棟数(棟)，M:中破棟数(棟)，l:大破棟数率(%)
m: 中破棟数率(%)，P: 人口，h:浸水深(m)

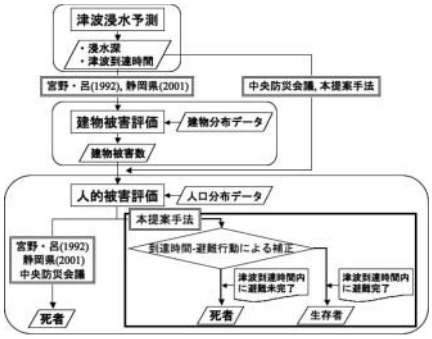

図-1　本論文の被害評価フロー

採用されている代表的な3つの手法を**表-1**に示す．大きく2つに手法が分かれており，家屋内での住民を対象とした場合とそれ以外になる．前者は，地震被害推定などと並列に評価される場合に多く用いられる手法である．

宮野・呂（1992）の関係式は，過去に発生した東南海地震（1944）において津波による被害が顕著であった三重県志摩半島以南の地域での家屋被害に着目し，その被害数と人的被害との関係を回帰分析により求めている．また，静岡県（2001）の関係式は，北海道南西沖地震（1993）の被害事例より，建物被害率と人的被害率の関係から導き出されたものである．

一方で，中央防災会議の手法は，北海道南西沖地震（1993）の被害事例より，建物被害ではなく浸水深さに着目して人的被害数との関係を表している．中央防災会議の手法は，他の2手法が建物被害より間接的に人的被害を評価しているのに対し，浸水深から直接人的被害の算出が可能である（**図-1**）．また，建物被害に依存しないことから，海水浴客等を考慮した，野外での人的被害も容易に評価できる点で異なる．

これら3手法は津波最大外力（浸水深など）との関係で人的被害を推定しているが，各々，対象としている過去の事例が異なる事や，推定に用いるパラメータが異なる．

（2）被害関数を用いた人的被害評価手法(本提案手法)

本論文では，前述した既存の3手法に加えて，2004年スマトラ島沖地震津波の被害評価よりKoshimuraら（2009）が構築した津波被害関数（浸水深に対する死亡率）を用いた人的被害評価手法を提案する．

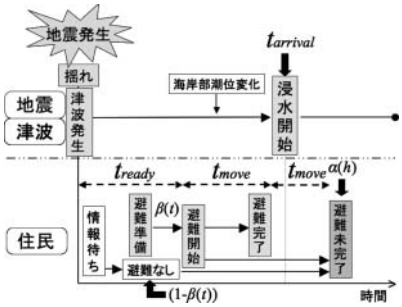

図-2　避難プロセスと人的被害評価式

Koshimuraら（2009）は，2004年スマトラ島沖地震津波での，インドネシアのバンダ・アチェにおける津波浸水計算結果と実際の人的被害調査データ（死者，行方不明者，生存者）より式（1）で示される津波被害関数を提案した．

$$\alpha(h) = \Phi\left[\frac{h-\mu}{\sigma}\right] \quad \cdots\cdots (1)$$

ここで，h:浸水深（m），Φ:標準正規分布の累積確率密度関数，$\alpha(h)$:浸水深h（m）の場合の死亡率，μ:バンダ・アチェにおけるhの平均値（μ=3.75），σ:バンダ・アチェにおけるhの標準偏差（σ=1.35）である．

本論文では，この被害関数を用い，津波による人的被害評価式を式（2）のように定義する．式（2）において，住民等の避難行動における避難所要時間や津波の浸水開始時間等の効果を考慮するため補正項β(t)を設定する．

$$D = P \times \alpha(h) \times \{1 - \beta(t) \times H(t)\} \quad \cdots\cdots (2)$$

$$H(t) = \begin{cases} 0 & (t_{arrival} - t_{ready} - t_{move} \leqq 0) \\ 1 & (t_{arrival} - t_{ready} - t_{move} > 0) \end{cases} \quad \cdots\cdots (3)$$

ここで，D:死者数，P:人口，α（h）:浸水深に対する死亡率，β（t）:浸水開始時間や避難所要時間を考慮した住民の避難率，$H(t)$:ステップ関数，$t_{arrival}$，t_{ready}，t_{move}:浸水開始時間，地震発生から避難開始までの準備時間，避難所までの移動時間である．被害算定は，津波被害関数に住民の避難行動を考慮する項β（t）と人口を掛け合わせることで求める．避難所要時間，避難率の考慮については5章で述べる．

4. 津波浸水予測

（1）対象地域

津波浸水予測の対象地域は，**図-3**に示す宮城県東松島市である．東松島市は，仙台市の北東に位置し，平成17年4月に旧矢本町と旧鳴瀬町の合併により誕生した人口4万3千人程度の市である．東松島市は「日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に係る地震防災対策の推進に関する

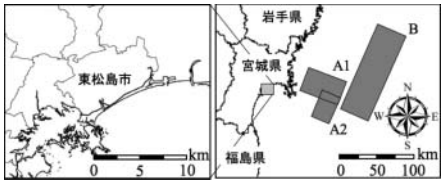

図-3　対象領域

表-2　宮城県沖地震（連動型）断層パラメータ

Region	L	W	d	θ	δ	λ	U
A1	36	64	26	200	21	90	3.10
A2	40	36	26	200	21	90	3.10
B	133	49	14	205	12	90	5.64

L :length(km)，W :wideth(km)，d :depth(km)，θ :strike of the fault(°)
δ :dip angle(°)，λ :slip angle(°)，U :dislocation(m)

特別措置法」（平成17年9月施行）により「津波に対する対策計画を作成して防災対策を講ずべき区域」に指定されており，現在，防災・減災に対する活動が積極的に行われている地域である．

（2）断層モデル

本論文では，対象地域において，今後の発生が懸念されている宮城県沖地震を設定した．宮城県沖地震は，記録されている過去6回の活動で1回が三陸沖南部海溝寄りの地震と連動して発生している．地震の長期評価では，図-4で示される断層A1，A2の破壊による「単独の場合」と，断層A1，A2および三陸沖南部海溝寄りの断層Bの破壊による「連動の場合」が想定されている．しかしながら現状として，宮城県沖地震の発生が単独型か連動型かの判断は困難であるため，発生した場合に地震規模が大きな連動型を想定する．

断層モデルのパラメータは，宮城県発表の「第三次地震被害想定調査報告書」（宮城県, 2004）より，宮城県沖地震（連動型）の場合（表-2）のものを用いる．また，断層A1，A2においては断層内部のアスペリティも考慮した．

（3）浸水予測計算

津波の浸水予測計算の基礎方程式として，連続式とNavier-Stokes方程式を水深方向に積分した，非線形長波理論を用いた．

$$\frac{\partial \eta}{\partial t}+\frac{\partial M}{\partial x}+\frac{\partial N}{\partial y}=0 \quad \cdots\cdots (4)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{M^2}{D}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{MN}{D}\right)+gD\frac{\partial \eta}{\partial x}+\frac{gn^2}{D^{7/3}}MQ=0 \quad \cdots (5)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{MN}{D}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{N^2}{D}\right)+gD\frac{\partial \eta}{\partial y}+\frac{gn^2}{D^{7/3}}NQ=0 \quad \cdots\cdots (6)$$

ここで，(x,y) :水平の直交する2方向座標，η:波高，t:時間，(M,N) :(x,y) 方向の線流量，D:$D=h+\eta$で表される全水深，g:重力加速度，n:マニングの粗度係数，Q:$Q=\sqrt{M^2+N^2}$ である．

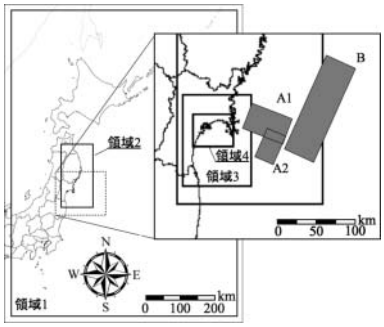

図-4　計算領域

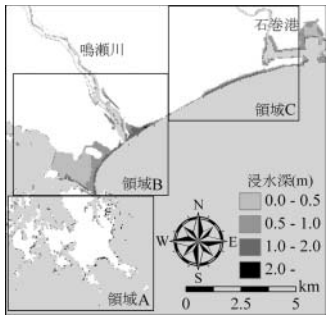

図-5　浸水予測結果

この方程式を図-4に示す計算領域（領域1-4）に対し差分化し計算を行う．空間格子サイズは領域1で1,350m，領域2で450m，領域3で150m，領域4で50mである．再現時間は4時間とした．また，計算に用いたマニング粗度係数，地形データは中央防災会議の公開データを利用した．

初期条件として，断層パラメータからMansinha・Smylie（1971）の方法を用いて計算した鉛直海底地盤変動量を，津波の初期波形として与える．

また，潮位は朔望平均満潮位とし，海岸構造物については，対象地域における地震の予想震度が6弱-6強と想定されているため機能しないものと仮定した．

（4）浸水予測結果

想定津波における浸水予測結果を図-5に示す．東松島市周辺では，最大浸水深が2m程度であると予想された．2mを超える浸水深が示される地点は，東松島市南部の島部，市の中心を流れる鳴瀬川河口部など限定的である．また，図-5の領域B内の平坦な低地が広く浸水する結果が得られたが，0-50cmの地域が大部分であり，海岸部に比べ大きな値ではない．そして市内の鳴瀬川を遡上していることも確認できる．

5. 人的被害評価

（1）人口分布データ

被害評価に用いる人口分布データは，津波浸水予測の50m格子に対応するものを作成する．データは，平成12

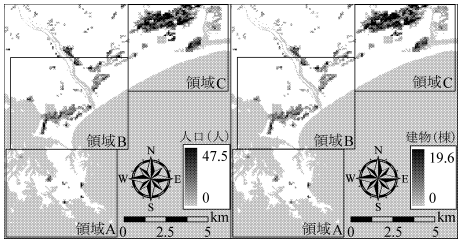

図-6　東松島市の人口・建物分布

年国勢調査100mメッシュ推計データより，東松島市において津波の計算格子内に存在する人口の合計値を各格子の値とした．また，被害評価は東松島市全域，領域A（島部），領域B（東松島市南部），領域C（東松島市北部）において行った．東松島市の人口分布を図-6に示す．

（2）建物分布データ

建物分布データは，人口分布データと同様の50m格子を作成する．このとき，建物数を直接求めることは困難であるため，世帯数を建物数の近似値として取り扱う．また実際は，一戸建てや集合住宅は区別すべきであるが，既存の被害評価における建物棟数を示すパラメータは建物数全体で評価しており，住宅の種類（一戸建て，長屋，共同住宅）による区別まで行われていない．作成は，平成12年国勢調査100mメッシュ推計データより，東松島市において津波の計算格子内に存在する世帯数の合計値を計算することで各格子の値とした．東松島市の建物分布を図-6に示す．

（3）人的被害の算定

既存の3手法と提案した被害評価手法により算出した人的被害数（死者数）をまとめると表-3のようになる．ここでは，算定値の精度に着目した議論ではなく，各手法間における相違点について比較検討を行う．また浸水開始時間と避難時間を考慮した評価結果も示し，さらに，被害評価の分解能の違いによる差異も評価する．

また，避難所要時間（$t_{ready}+t_{move}$）を考慮する場合，一定の所要時間で避難完了するものと仮定する．ここで，東松島市での海岸部への津波到達時間が50分程度であるので，避難の効果を考慮するため避難所要時間は津波到達時間より長いものとし，$t_{ready}+t_{move}$=60（分）とする．

a）宮野・呂（1992）の関係式

建物被害棟数は，まず人口統計データより50m格子の建物データに木造・非木造の比率（木造=90.5%，非木造=9.5%）を掛け，格子内の木造建物，非木造建物の割合を一定として建物数を算出する．そして，首藤（1988）による浸水深と被害の関係により浸水深に応じた被害を求め，領域毎に合計することにより求める．宮野・呂（1992）の手法は，建物被害が直接的に人的被害算出に影響する．想定津波による建物被害棟数を表-4に示す．これより，今回は大破・中破棟数は比較的少ないといえる．そのため，この手法を用いると他の手法に比べ過小評価されるものと考えられる．推定値は格子毎の値としてではなく領域全体の値として算出される．

表-3　人的被害評価結果（50m格子）

	全域	領域A	領域B	領域C
宮野・呂(1992)	約1人	約0人	約1人	約0人
静岡県(2001)	約125人	約5人	約106人	約13人
中央防災会議	約93人	約4人	約78人	約10人
本提案手法①	約68人	約9人	約50人	約9人

表-4　建物被害評価結果（50m格子）

	全域	領域A	領域B	領域C
大破棟数(棟)	約1棟	約1棟	約0棟	約0棟
中破棟数(棟)	約17棟	約4棟	約12棟	約0棟

b）静岡県（2001）の関係式

この手法は，前述した宮野・呂（1992）の手法と同様に，建物被害から間接的に人的被害を推定する手法である．結果より他の手法と比較すると大きな値を示している．この結果より，建物被害から人的被害を求める手法間においても推定値に大きな差が出ることが分かる．

c）中央防災会議の手法

この手法は，宮野・呂（1992），静岡県（2001）の手法と異なり，浸水深より直接人的被害を算出可能である．また，格子毎で被害数を推定しているため，どこで，どれだけの値であるか，格子単位で比較が可能となる．

d）津波被害関数による人的被害評価法（本提案手法①）

この手法は，中央防災会議の手法同様に，浸水深より直接人的被害を推定するものである．本提案手法①では避難行動が行われないものとし式(2)でβ(t)=0とした．推定値は，中央防災会議の手法に最も近くなっている．これはバンダ・アチェでの事例においても，日本の事例（北海道南西沖地震津波）のような被害傾向を示している事が考えられる．

また，全ての手法において領域Bでの被害者数が最大となり手法の違いに寄らないことが確認された．

e）避難行動を考慮した評価（本提案手法②）

ここでは，避難行動を考慮した場合の被害評価を示す．住民の避難率を一定と仮定し，避難意識が低い場合として避難率が2割，高い場合として8割とした．避難行動の違いによる被害評価結果を表-5に示す．結果より，領域A, Cでは避難完了前に津波が到達するため，被害数に大きな違いは見られないものの，領域Bでは，避難行動による被害数の減少が確認できる．ここでは，避難行動による補正を一定と仮定したことから，今後，実際の避難行動に従った避難率の考慮が必要である．

f）被害評価の分解能の違いによる差異

被害評価を実施する場合，計算格子サイズが細かいこ

表-5 避難率を考慮した人的被害評価結果（本提案手法②）

	全域	領域A	領域B	領域C
避難率= 0	約68人	約9人	約50人	約9人
避難率= 0.2	約64人	約9人	約46人	約9人
避難率= 0.8	約51人	約9人	約33人	約8人

表-6 人的被害評価結果（150m格子）

	全域	領域A	領域B	領域C
宮野・呂(1992)	約2人	約0人	約2人	約0人
静岡県(2001)	約109人	約3人	約103人	約3人
中央防災会議	約79人	約2人	約75人	約2人
本提案手法①	約53人	約7人	約45人	約1人

とが理想的であるが，その反面，計算時間が長くなる．ここでは50mの計算格子を基準として，粗い格子（150m）で被害評価を行った場合，どの程度精度が保たれるのか検討を行った．格子サイズの違いによる人的被害評価結果を**表-6**に示す．

評価結果より，宮野・呂（1992）らの手法以外3手法では，150m格子の場合の方が過小評価であることがわかる．また，領域Bでは50m，150m格子それぞれの値に大きな差異はなく格子サイズに寄らないことがわかる．格子サイズの違いによる被害評価結果の差異は，津波浸水分布の複雑性と，人口分布データの作成時に発生する差異が影響しているものと考えられるため，評価の際は注意が必要である．

6. 最後に

本論文では，人的被害に着目し宮城県東松島市を対象とした津波浸水予測ならびに，既存の人的被害評価手法に加え，2004年のスマトラ島沖地震津波の被害評価より提案された津波被害関数を用いた人的被害評価に関して比較検討を行った．被害推定値は，各手法によってパラメータの違いにより，一概にどの評価手法が正しいのかという精度についての議論は難しいが，パラメータの影響が大きいことは明確である．また，津波リスクマップ作成のために詳細な空間情報の必要性があることから，格子毎で被害推定が可能である手法が適切である．現時点では，その手法として中央防災会議の手法，そして津波被害関数を用いた手法が適応可能であると言える．

この2手法の被害評価結果（**表-3**）を用いリスク評価を行うと，宮城県沖地震（連動型）発生確率を1/200（年）とする場合，[発生する被害]×[津波ハザード来襲確率]から，

・中央防災会議の手法

$$93 \times 1/200 = 0.46 \text{（人/年）}$$

・津波被害関数を用いた手法

$$68 \times 1/200 = 0.34 \text{（人/年）}$$

と東松島市における津波リスクが算定される．これは，東松島市での交通事故死亡リスクが約1.6（人/年）であることから決して低いリスクであるとは言えない．さらに宮城県沖地震（単独型）の場合は，発生確率を1/37（年）とすると中央防災会議の手法では2.51（人/年），津波被害関数を用いた手法では1.84（人/年）となり，交通事故での死亡リスク以上であることがわかる．

今後は，本研究で得られた知見に加え，本論文において仮定として扱った住民の避難行動の項目についてさらに検討を行った上で，リスクマップ作成に取り組んで行く必要がある．

参 考 文 献

今村文彦（2008）：津波による被災メカニズム，地盤工学会誌，Vol. 56，No. 11，pp. 5-7.

河田恵昭・小池信昭・島田富美男（1994）：津波の伝播特性に基づく危険度評価について，海岸工学講演会論文集，第41巻，pp. 1181-1185.

河田恵昭・小池信昭・井上雅夫・嘉戸重仁（1997）：環太平洋沿岸域における津波リスクに関する研究，海岸工学講演会論文集，第44巻，pp. 341-345.

地震調査研究推進本部 地震調査委員会（2005）：確率論的地震動予測地図の説明，「全国を概観した地震動予測地図」報告書，pp. 64-68.

静岡県（2001）：第3次地震被害想定結果，pp. 171-175.

社会資本整備審議会都市計画・歴史的風土分科会都市計画部会（2008）：安全・安心まちづくりの施策の現状と課題，第1回安全安心まちづくり小委員会・配布資料，資料6，p.13.

首藤伸夫（1988）：津波災害の変遷と対策上の問題点，海岸工学講演会論文集，第35巻，pp. 237-241.

首藤伸夫ら（2007）：津波の事典，朝倉書店，p. 350.

損害保険料率算出機構（2008）：地震保険研究16，pp. 5-14.

中央防災会議東南海，南海地震等に関する専門調査会：http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/index_nankai.html，参照 2009-01-25.

中長期的な展望に立った海岸保全検討会（2007）：中長期的な展望に立った海岸保全検討会中間取りまとめ，p. 2，http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha07/11/111226/01.pdf.

日本リスク研究学会（2006）：リスク学事典，阪急コミュニケーションズ，p.16.

松田真盛（2003）：高潮災害へのリスクマネジメント手法の適用，海岸工学講演会論文集，第50巻，pp. 1326-1330.

宮城県（2004）：第三次地震被害想定調査報告書，巻末資料，p.5.

宮野道雄・呂 恒倹（1992）：既往の被害調査資料に基づく地震時の人的被害に関する検討，地域安全学会論文報告集，No. 2，pp. 127-135.

Koshimura, S., T. Oie, H. Yanagisawa and F. Imamura (2009)：Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia，Coastal Engineering Journal, JSCE, in press.

Mansinha, L. and D. E. Smylie (1971)：The Displacement Fields of Inclined Faults，Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 61，No. 5，pp. 1433-1440.